

증착 온도에 따른 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 광학 특성

조신호 

신라대학교 신소재공학부

Effect of Deposition Temperature on the Optical Properties of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ Phosphor Thin Films

Shinho Cho

Division of Materials Science and Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

(Received May 23, 2019; Revised July 1, 2019; Accepted July 2, 2019)

Abstract: Dy^{3+} and Eu^{3+} -co-doped La_2MoO_6 phosphor thin films were deposited on sapphire substrates by radio-frequency magnetron sputtering at various growth temperatures. The phosphor thin films were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy, ultraviolet-visible spectroscopy, and fluorescence spectrometry. The optical transmittance, absorbance, bandgap, and photoluminescence intensity of the La_2MoO_6 phosphor thin films were found to depend on the growth temperature. The XRD patterns demonstrated that all the phosphor thin films, irrespective of growth temperatures, had a tetragonal structure. The phosphor thin film deposited at a growth temperature of 100°C indicated an average transmittance of 85.3% in the 400~1,100 nm wavelength range and a bandgap energy of 4.31 eV. As the growth temperature increased, the bandgap energy gradually decreased. The emission spectra under ultraviolet excitation at 268 nm exhibited an intense red emission line at 616 nm and a weak emission line at 699 nm due to the $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ and $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ transitions of the Eu^{3+} ions, respectively, and also featured a yellow emission band at 573 nm, resulting from the $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ transition of the Dy^{3+} ions. The results suggest that La_2MoO_6 phosphor thin films can be used as light-emitting layers for inorganic thin film electroluminescent devices.

Keywords: Sputtering, Thin film, Photoluminescence

1. 서론

최근에 산화물 형광체 박막은 균일한 결정 입자, 높은 화학적 안정성, 우수한 분해능을 나타내기 때문에 고체 광원, 디스플레이, 백색 발광다이오드, 전계발광 소자의 발광층, 표면 온도 측정 분야로 그 응용성을 확장하고 있다 [1-3]. 일반적으로 형광체는 분말 혹은 박막 형태

로 개발되어 디스플레이 평판과 단파장 발광 다이오드에 도포되어 원하는 발광 파장과 효율을 갖는 광전자 소자로 제작되고 있다. 형광체 분말을 사용하는 경우에 유기물 용제를 사용하여 평판에 결합하기 때문에 발광 효율과 분해능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고, 무기물 전계발광 소자를 제조하기 위한 높은 발광 효율을 갖는 적색-녹색-청색광 박막을 개발하기 위하여 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition), 졸겔(sol-gel), 분무열분해법(spray pyrolysis), 스퍼터링(sputtering) 법을 사용하여 박막 형태로 성장하는 데 많은 노력이 경주되고 있다 [4-8]. 예를 들면, Eckert 등 [9]은 졸겔 방법을 사용하여 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{M}^{3+}$ ($\text{M}=\text{Dy}, \text{Cr}, \text{Tm}$) 은

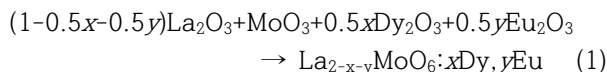
✉ Shinho Cho; scho@silla.ac.kr

도 기록용 형광체(thermographic phosphor) 박막을 제조하였고, 형광체의 감쇄 시간을 측정하여 극한 환경에서 표면 온도를 측정하는 온도 영역을 확장하였음을 발표하였다. Dimitrova 등 [10]은 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 Er이 도핑된 비정질 AlN 박막을 제조하여 청녹색(479, 538, 559 nm) 발광 스펙트럼을 방출하였음을 보고하였다. Koide 등 [11]은 분무열분해법을 사용하여 Eu^{3+} 이온이 도핑된 $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 발광층을 증착하였고, 상기의 층을 포함하는 전계발광 소자를 제작하여 200 V의 교류 전압을 인가하여 611 nm의 적색광을 방출하였다.

본 연구에서는 라디오파 마그네트론 스퍼터링(radio-frequency magnetron sputtering) 방법을 사용하여 서로 다른 증착 온도에서 사파이어 기판 위에 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막을 성장시켜서 박막의 결정 구조, 표면과 발광 특성, 파장에 따른 투과율과 흡수율의 변화를 조사하였다. 특히, 란탄 몰리브덴산염(La_2MoO_6)은 자외선 영역에서 높은 흡광율과 희토류 활성화제 이온으로 에너지 전달 효율이 크기 때문에 형광체 박막의 모체 결정으로 선택하였다 [12]. 또한, 광학 흡수 계수와 광자 에너지 사이의 관계식을 사용하여 증착 온도에 따른 박막의 밴드갭 에너지의 변화를 체계적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

Dy^{3+} 와 Eu^{3+} 이온이 도핑된 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막은 라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 사파이어 기판 위에 증착 온도 100~400°C에서 성장시켰다. 직경 1인치의 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 스퍼터링 타겟은 초기 화학 물질 La_2O_3 (순도: 99.9%), MoO_3 (99.9%), Dy_2O_3 (99.9%), Eu_2O_3 (99.9%)을 화학양론적으로 준비하였고, 고상반응법(solid-state reaction process)을 사용하여 혼합과 분쇄 과정, 건조 과정을 거쳐서 박스형 전기로에 넣어 400°C에서 3시간 동안 하소 공정과 1,100°C에서 5시간 동안 소결 과정을 통하여 화학 반응식 (1)과 같이 형광체 분말을 합성하였다. 이때 Dy_2O_3 와 Eu_2O_3 의 함량은 각각 $x=2.5$ mol%와 $y=5$ mol%로 선택하였다.



유압 프레스를 사용하여 제조한 형광체 분말 시료에 40 MPa의 압력을 30분 동안 인가하여 직경 1인치의 원형 소결체 타겟을 만들었다. 사파이어 기판은 1 cm × 1 cm의 크기로 절단하여 아세톤, 에탄올, 증류수 순서로 각각 10분씩 초음파 세척을 실시하였고, 질소 가스로 기판에 남아 있는 습기를 제거한 후에 시편 고정대에 장착하였다. 스퍼터링 챔버는 터보분자 펌프(turbomolecular pump)를 사용하여 초기 진공도를 4×10^{-6} Torr로 배기하였고, 증착 시 스퍼터링 가스로는 아르곤 가스를 40 sccm 공급하여 챔버의 진공도를 30 mTorr로 유지하였다. 기판의 온도는 시편 고정대 뒤에 장착되어 있는 할로겐램프에 공급하는 전류의 양을 제어하여 100, 200, 300, 400°C로 유지하였다. 타겟과 시편 고정대 사이의 간격은 5 cm로 고정하였으며, 균일한 박막을 얻기 위하여 모터로 시편 고정대를 15 rpm의 속도로 회전시키면서 3시간 동안 파워 40 W에서 증착시킨 후에 800°C에서 20분 동안 급속 열처리를 수행하였다 [그림 1 참조].

박막의 결정 구조는 $\text{Cu-K}\alpha$ 복사선을 사용하는 X-선 회절법(X-ray diffraction: XRD, Ultima IV, Rigaku)으로 회절각 10~60° 영역에서 측정하였으며, 박막의 흡수율과 투과율은 자외선-가시광 분광광도계(Lambda 365, PerkinElmer)를 사용하여 조사하였고, T_{auc} 의 식 [13]을 사용하여 광학 밴드갭 에너지를 계산하였다. 박막의 발광 스펙트럼은 형광광도계(FS-2, Scinco)를 사용하여 상온에서 측정하였으며, 결정 입자의 크기, 형상과 두께는 전계형 주사전자현미경(FE-SEM, S4300, Hitachi)을 사용하여 촬영하였다.

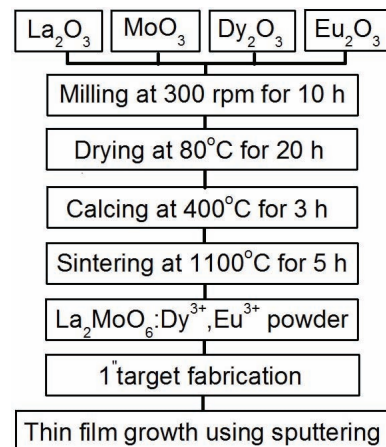


Fig. 1. Flow chart of the fabrication of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films via solid-state reaction and sputtering methods.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 서로 다른 증착 온도로 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막을 X-선 회절법으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 회절각 $11.02^\circ, 22.82^\circ, 27.58^\circ, 30.88^\circ, 33.62^\circ, 45.38^\circ$ 에 중심을 갖는 La_2MoO_6 (002), (101), (103), (110), (006), (107) 면에서 발생한 회절 피크가 관측되었다. 상기의 회절 피크는 ICDD PDF #01-074-0182와 일치하는 정방정계(tetragonal system)의 결정구조를 나타낸다. 증착 온도 100°C 와 200°C 에서 성장한 박막의 경우에 주 회절 피크는 (006) 면에서 발생하였으나, 증착 온도가 증가함에 따라 주 회절 피크는 (103) 면에서 관측되었다. 증착 온도가 200°C 에서 300°C 로 증가함에 따라 결정 입자의 크기가 급격하게 감소하면서 우선 배향(preferred orientation)이 바뀌는 결과를 초래하였다.

그림 3과 4는 서로 다른 증착 온도에서 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 표면과 측면을 주사전자현미경으로 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 보듯이, 100°C 에서 증착된 박막의 경우에 결정 입자의 평균 크기는 700 nm 이었고, 전반적으로 사다리꼴 모양의 입자가 불규칙하게 분포된 형태를 보였다. 증착 온도 200°C 에서 결정 입자의 평균 크기는 $1.1\ \mu\text{m}$ 로 증가하였으나, 300°C 에서 입자의 크기는 450 nm 으로 급격하게 감소하였으며 입자의 크기 분포는 비교적 작았다. 400°C 에서는 두 종류의 입자가 관측되었는데, 평균 250 nm 의 크기를 갖는 작은 입자들이 780 nm 의 큰 입자들 사이에 배치된 모양으로 나타났

다. 그림 4에서 보듯이, 박막의 두께는 $180\sim 250\text{ nm}$ 이었으며, 증착 온도가 증가함에 따라 두께는 증가하는 추세를 나타내었고, 형광체 박막이 사파이어 기판 상부에 잘 결합되어 있음을 볼 수 있다.

그림 5는 자외선-가시광 분광광도계를 사용하여 서로 다른 증착 온도에서 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막에서 측정한 흡수율(absorbance)과 투과율(transmittance) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 형광체 박막의 밴드갭 에너지에 대응되는 파장 300 nm 이하에서는 강한 광흡수 현상이 발생하여 박막의 투과율이 현저히 작았다. 그림 5의 삽입 그림에서 보듯이, 100°C 에서 성장시킨 박막의 흡수단(absorption edge)은 357

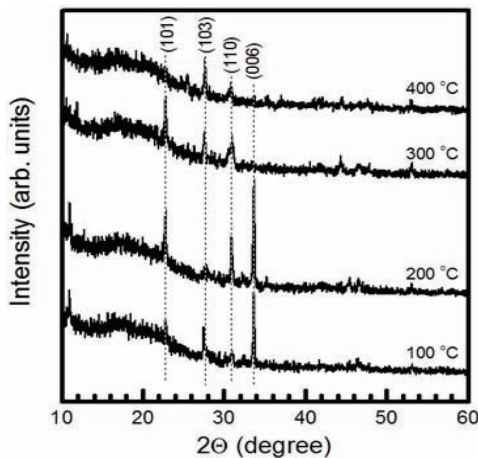


Fig. 2. XRD patterns of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at several growth temperatures.

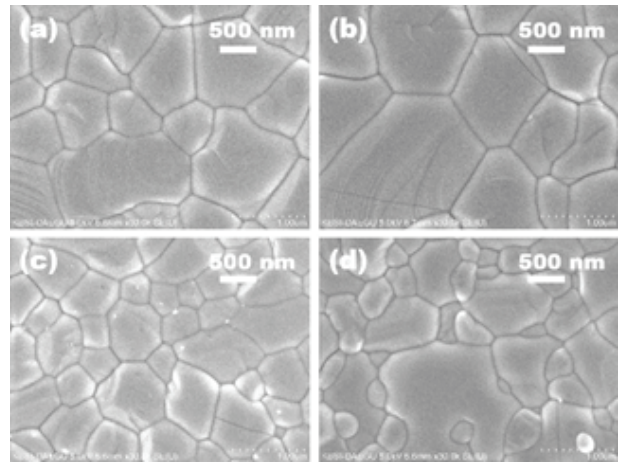


Fig. 3. SEM surface images of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at (a) 100°C , (b) 200°C , (c) 300°C , and (d) 400°C .

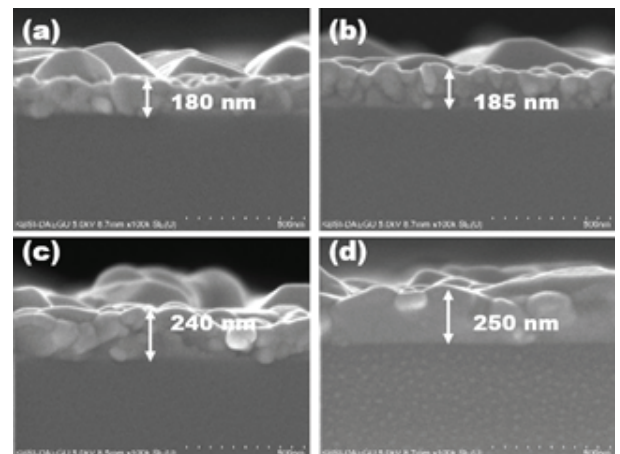


Fig. 4. SEM cross-sectional images of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at (a) 100°C , (b) 200°C , (c) 300°C , and (d) 400°C .

nm에서 발생하였으며, 증착 온도가 200, 300, 400°C로 증가함에 따라 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 흡수단은 각각 364, 369, 377 nm로 증가하였다. 박막의 투과율은 광학 흡수율 A 과 투과율 $T(\%)$ 사이의 상관관계를 나타내는 식, $T(\%) = 10^{2-A}$ 을 사용하여 계산할 수 있다 [14]. 증착 온도 100, 200, 300, 400°C에서 성장한 형광체 박막의 평균 투과율은 파장영역 400~1,100 nm에서 85.3, 81.8, 81.0, 80.5%이었다. 상기의 실험 결과는 YAG:Ce 형광체 박막에서 열처리 온도가 증가함에 따라 투과율이 감소하는 결과와 유사하였다 [15].

그림 6은 서로 다른 증착 온도에서 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막에서 측정된 흡수 계수의 제곱 $(\alpha h\nu)^2$ 과 광자 에너지 $h\nu$ 사이의 관계를 나타낸 결과이다. 여기서 α 는 흡수 계수, h 는 플랑크 상수, ν 는 진동수이다. $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 밴드갭 에너지는 그림 6에서 급격히 증가하는 흡수단 영역의 데이터를 가장 잘 맞추는 직선을 그어서 y 축의 값, 즉 $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 이 되는 x 축의 값으로 결정하였다. 증착 온도 100°C에서 성장한 박막의 밴드갭 에너지는 4.31 eV이었으며, 증착 온도가 200, 300, 400°C로 증가함에 따라 밴드갭 에너지는 점차적으로 감소하여 각각 4.23, 4.16, 4.02 eV를 나타내었다. 성장 조건에 따라서 박막의 밴드갭 에너지가 변하는 현상은 박막의 결정성, 입자의 크기와 균일 분포성, 투과도, 도핑 불순물의 농도와 같은 다양한 요인으로 발생하는 것으로 알려져 있다 [16,17]. 본 연구의 경우에는 그림 3의 SEM 데이터에서 보듯이, 증착 온도가 저온에서 300°C와 400°C로 증가함에 따라 나타나는 비교적 작은 결정 입자의

균일한 크기 분포성, 투과도, 박막의 결정성과 관련되어 박막의 밴드갭 에너지가 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

그림 7은 서로 다른 증착 온도에서 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막에서 측정된 흡광(photoluminescence excitation) 스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 방출 파장 573 nm로 제어하였을 때 400°C에서 증착된 형광체 박막의 흡광 스펙트럼은 268 nm에 피크를 갖고 240~290 nm의 넓은 파장 영역에 걸쳐서 나타나는 O^{2-} 음이온과 Dy^{3+} 양이온 사이의 전하 전달 밴드(charge transfer band, CTB)에 의한 전이 신호로 구성되었다 [18]. 증착 온도가 감소함에 따라 흡광 스펙트럼의 세기는 점점

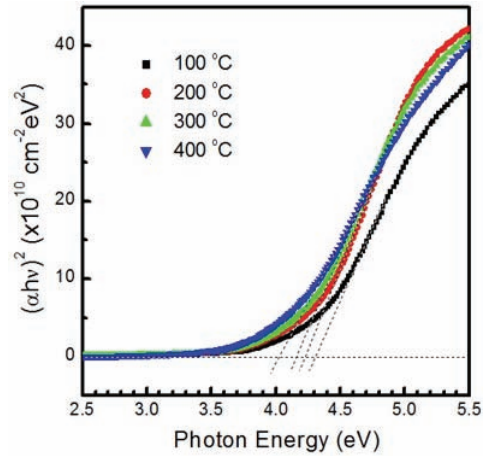


Fig. 6. Band gap energy of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at several growth temperatures.

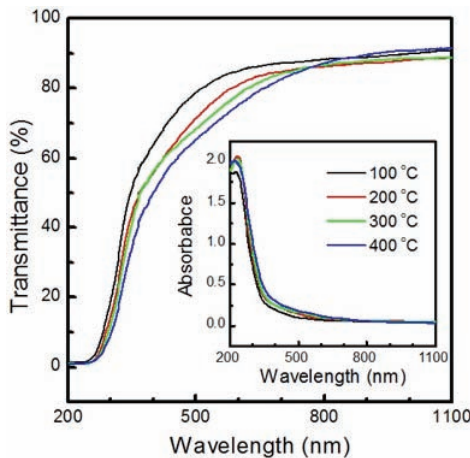


Fig. 5. Transmittance and absorbance (inset) spectra of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at several growth temperatures.

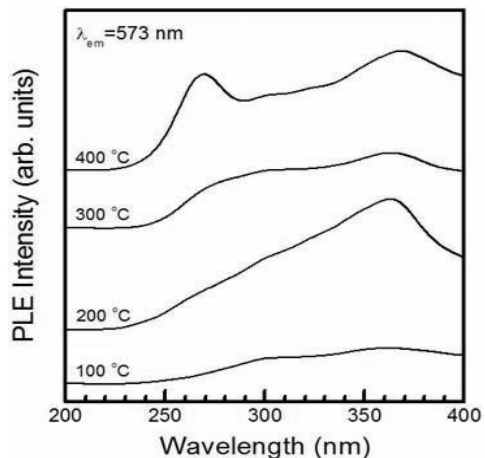


Fig. 7. Excitation spectra of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at several growth temperatures.

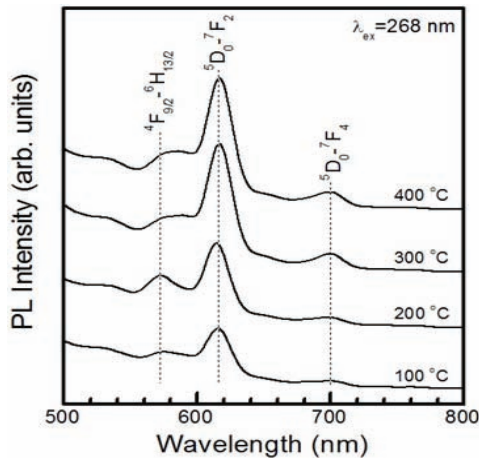


Fig. 8. Photoluminescence spectra of $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ thin films deposited at several growth temperatures.

감소하였으며, 100°C와 200°C에서 성장된 박막의 경우에 흡광 스펙트럼의 세기는 미약하였다.

그림 8은 서로 다른 증착 온도로 성장한 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막을 파장 268 nm로 여기시켰을 때 관측된 발광(photoluminescence) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 증착 온도 100°C에서 증착된 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 발광 스펙트럼은 573, 616, 699 nm에서 발생하였으며, 상기의 발광 스펙트럼은 Dy^{3+} 와 Eu^{3+} 이온의 $4f \rightarrow 4f$ 전이에 의하여 발생하였다. 특히, 발광 파장 중에서 573 nm에 피크를 갖는 황색 발광 스펙트럼은 Dy^{3+} 이온의 $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{13/2}$ 전이에 의하여 발생한 발광 신호이며, 616 nm와 699 nm에 정점을 갖는 적색 발광 스펙트럼은 Eu^{3+} 이온의 $5D_0 \rightarrow 7F_2$ 와 $5D_0 \rightarrow 7F_4$ 전기 쌍극자 전이에 의해 각각 발생한 발광 신호들이다 [19]. 세 종류의 발광 스펙트럼 중에서 제일 강한 발광 신호는 선택 규칙(selection rule) $\Delta J=2$ 를 만족하는 Eu^{3+} 이온의 $5D_0 \rightarrow 7F_2$ 전기 쌍극자 전이에 의한 발광 신호이다. 전기 쌍극자 전이의 경우에, La_2MoO_6 모체 격자 내에 위치하는 Eu^{3+} 이온은 국소적인 환경에 매우 민감한 영향을 받고, 비반전 대칭(non-inversion symmetry) 자리에 위치하는 것으로 알려져 있다 [20]. 증착 온도가 증가함에 따라 Dy^{3+} 이온에 의한 황색 발광과 Eu^{3+} 이온에 의한 두 적색 발광 스펙트럼의 세기는 순차적으로 증가하여 증착 온도 400°C에서 최대 발광 세기를 나타내었다. 증착 온도 400°C에서 성장된 박막에서 관측된 616 nm의 주 발광 스펙트럼의 세기는 100°C에서 증착한 박막의 발광 세기에 비하여 약 5배 증가하였다.

4. 결론

라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착 온도를 변화시키면서 성장시킨 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 결정 구조, 흡수율과 투과율, 광학 밴드갭 에너지, 발광 스펙트럼의 변화를 측정하였다. 증착 온도에 관계없이 모든 $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 결정 구조는 정방 정계이었다. 파장 268 nm로 형광체 박막을 여기시켰을 때, Dy^{3+} 이온의 $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{13/2}$ 전이에 의한 573 nm의 황색 발광과 Eu^{3+} 이온의 $5D_0 \rightarrow 7F_2$ 전이와 $5D_0 \rightarrow 7F_4$ 전이에 의한 각각 616 nm와 699 nm의 적색 발광이 동시에 관측되었다. 증착 온도가 증가함에 따라 모든 발광 스펙트럼의 파장은 이동하지 않았으나, 발광 세기는 순차적으로 증가하였다. 형광체 박막의 최대 투과율은 증착 온도 100°C에서 제작된 형광체 박막에서 85.3%이었으며, 밴드갭 에너지는 4.31 eV이었다. 실험 결과로부터, $\text{La}_2\text{MoO}_6:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막은 백색 발광 다이오드와 고체 광원으로 응용하기에 적합한 박막 소재임을 제시한다.

ORCID

Shinho Cho

<https://orcid.org/0000-0002-2849-188X>

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2017R1D1A3B03034497).

REFERENCES

- [1] L. Wang, W. Guo, H. Hao, Q. Su, S. Jin, H. Li, X. Hu, L. Qin, W. Gao, and G. Liu, *Mater. Res. Bull.*, **76**, 459 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.01.013>]
- [2] J. Fan, C. Yu, C. Qian, X. Fan, and G. Zhang, *Microelectron. Reliab.*, **70**, 179 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.04.012>]
- [3] H. Fukada, K. Ueda, J. I. Ishino, T. Miyata, and T. Minami, *Thin Solid Films*, **518**, 3067 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.014>]
- [4] S. Bar. H. Scheife, and G. Huber, *Opt. Mater.*, **28**, 681 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2005.09.043>]

- [5] C. K. Lin, M. Yu, M. L. Pang, and J. Lin, *Opt. Mater.*, **28**, 913 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2005.04.009>]
- [6] T. Minami, T. Nakatani, T. Miyata, and T. Shirai, *Surf. Coat. Technol.*, **146**, 508 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01377-9](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01377-9)]
- [7] J. Hao, S. A. Studenikin, and M. Cocivera, *J. Lumin.*, **93**, 313 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-2313\(01\)00207-1](https://doi.org/10.1016/s0022-2313(01)00207-1)]
- [8] A. Kawasumi, T. Nakajima, H. Kominami, Y. Nakanishi, and Y. Hatanaka, *J. Cryst. Growth*, **214**, 963 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(00\)00268-2](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(00)00268-2)]
- [9] C. Eckert, C. Pflitsch, and B. Atakan, *Prog. Org. Coat.*, **67**, 116 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.10.018>]
- [10] V. I. Dimitrova, P. G. Van Patten, H. Richardson, and M. E. Kordesch, *Appl. Surf. Sci.*, **175**, 480 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(01\)00128-3](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(01)00128-3)]
- [11] T. Koide, M. Ito, T. Kawai, and Y. Matsushima, *Mater. Sci. Eng., B*, **178**, 306 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.12.008>]
- [12] F. Meng, X. Zhang, H. Li, and H. J. Seo, *J. Rare Earths*, **30**, 866 (2012). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60147-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60147-1)]
- [13] W. Lin, R. Ma, W. Shao, and B. Liu, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 5179 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.11.032>]
- [14] J. Shin and S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **74**, 177 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.74.177>]
- [15] W. H. Chao, R. J. Wu, and T. B. Wu, *J. Alloys Compd.*, **506**, 98 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.136>]
- [16] K. Mahmood, S. Bashir, M.K.U. Rahman, N. Farid, M. Akram, A. Hayat, and F. U. Haq, *Surf. Rev. Lett.*, **20**, 1350032 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1142/s0218625x13500327>]
- [17] B. P. Yan, J. S. Luo, and Q. L. Zhang, *J. Appl. Phys.*, **77**, 4822 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.359406>]
- [18] R.G.A. Kumar, S. Hata, K. I. Ikeda, and K. G. Gopchandran, *Ceram. Int.*, **41**, 6037 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.051>]
- [19] M. D. Chambers, P. A. Rousseve, and D. R. Clarke, *J. Lumin.*, **129**, 263 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2008.10.008>]
- [20] F. Bi, X. Dong, J. Wang, and G. Liu, *Mater. Res.*, **18**, 411 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.351314>]